شبیه‌سازی عددی گرمایی- ساختاری فرایند کوئنچ فولادها

محسن اشراقی کاخکی*، احمد کرمانپور** و محمدعلی گلعذار***

دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۴/۸- دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۱۲/۱۱)

چکیده – در این تحقیق، یك مدل گرمایي- ساختاري سه بعدي براي شبیه‌سازي عددي فرایند سرد کردن پیوسته فولادها توسعه داده شد. مدل توسعه یافته، براي شبیه‌سازي فرایند سرد شدن قطعات چرخ‌دنده از جنس فولاد ساده کربني ۱۰۴۵ و فولاد کم‌آلیاژ ۴۱۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب انتقال گرما حین کوئنچ در دو محیط آب و روغن توسط روشهاي تجربي و حل معکوس به صورت تابعي از دماي سطح ارزیابي شد. خواص ترموفیزیکي فولاد به صورت تابعي از دما و نوع فازها در نظر گرفته شد و اثر گرماي آزاد شده حین دگرگونیهاي فازي در مدل اعمال شد. براي اعتبارسنجي و بررسي کارایي مدل، آزمایشهاي تجربي شامل ثبت تاریخچه دمایي و متالوگرافي و سختي‌سنجي نمونه‌ها انجام شد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازي با نتایج آزمایشات تجربي، کارایي و دقت مدل را تأیید کرد. با استفاده از مدل حاضر، ریزساختار و سختي چرخ دنده‌هاي فولادي پس از فرایند سرد کردن پیوسته در شرایط مختلف پیش‌بیني شد.

واژگان کلیدی : **فولاد، کوئنچ، شبیه‌سازي عددي، دگرگوني فازي**

Thermo-Microstructural Numerical Simulation of Quenching Process of Steels

M. Eshraghi Kakhki, A. Kermanpur and M. A. Golozar

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 8415683111, Iran

Abstract: ***In this work, a 3D thermo-microstructural model was developed to simulate the continuous cooling of steel. The model was employed for simulation of cooling process of the gears made from a plain carbon steel (AISI 1045) and a low alloy steel (AISI 4140). Temperature-dependent heat transfer coefficients for two different quenching media were evaluated by experimental and computational methods. The effects of latent heat releases during phase transformations, temperature and phase fractions on the variation of thermo-physical properties were investigated. The present model was validated against cooling***

---

* – کارشناس ارشد ** – دانشیار *** – استاد

curve measurements, metallographic analysis, and hardness tests, and good agreement was found between the experimental and simulation results. This model was used to simulate the continuous cooling process and to predict the final distribution of microstructures and hardness in steel gears.

Keywords: ***Steel, Quenching, Numerical simulation, Phase transformation.***

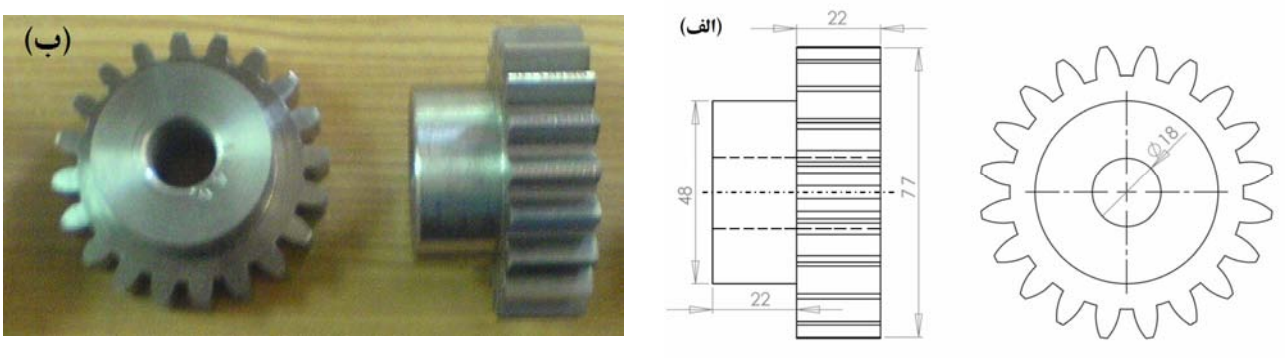
۱- مقدمه

عملیات گرمایی یکی از مراحل مهم و ضروری در تولید محصولات فولادی است و چگونگی انجام آن نه تنها کیفیت و کارایی قطعه، بلکه هزینه‌های تولید را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با انتخاب صحیح ترکیب شیمیایی و ساختار متالورژیکی یک قطعه، خواص مکانیکی مانند سختی، استحکام و چقرمگی قابل کنترل است. عملیات گرمایی از یک سو به عنوان روشی کم‌هزینه و آسان برای تغییر و تنظیم خواص مکانیکی فولادها از مدتها قبل مورد توجه و کاربرد بوده و از طرف دیگر به خاطر کثرت پارامترهای مؤثر برآن و پیچیده بودن نقش این پارامترها در نتیجه نهایی عملیات، موضوعی مهم برای پژوهش و تحقیق بوده است. امروزه کدهای شبیه‌سازی عددی در زمینه‌های مختلف مهندسی متالورژی و مواد با سرعت زیادی در حال توسعه و تکمیل است، به‌طوری که فرایندهای پیچیده‌ای هم‌چون تشکیل ساختار میکروسکوپی قطعات که تا پیش از این غیر قابل محاسبه و تخمین تصور می‌شد نیز به تدریج در حال مدلسازی‌اند. در طراحی و تولید مبتنی شبیه‌سازی، اثرات عملیات گرمایی پیشاپیش محاسبه می‌شود و بنابراین می‌توان با تغییر پارامترهای مختلف، فرایند را بهینه کرد. هنگام طراحی قطعه، اغلب اطمینان از مناسب بودن فرایند عملیات گرمایی انتخاب شده بسیار مهم است. شبیه‌سازی رایانه‌ای به‌خوبی می‌تواند این امر را بررسی کند و به طراحان قطعات و کاربران عملیات گرمایی کمک کند تا ضمن افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت قطعات، هزینه‌های تولید را کاهش دهند.

بسیاری از محققان از جمله آگاروال و بریماکومب [۱] تلاشهایی برای مدلسازی دگرگونیهای فازی انجام دادند. با این حال آنها فقط دگرگونیهای یوتکتوییدی را مدنظر قرار دادند. در تحقیقات دیگری نیز روش مشابهی برای پیش‌بینی تاریخچه دمایی در طول سرد کردن فولادهای یوتکتوییدی مورد استفاده قرار گرفته است. ونگ و همکاران [۲] تلاشهایی برای پیش‌بینی تنشهای گرمایی با در نظر گرفتن دگرگونیهای فازی انجام دادند. هوپینگ و همکاران [۳] یک برنامه المان محدود برای حل کوپله دمایی- تنشی- تغییر فاز توسعه دادند و سپس نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشات متالوگرافی و سختی‌سنجی برای سردایش فولاد P20 مقایسه کردند. کَنگ و ایم [۴و۵] با ارائه یک برنامه المان محدود سه بعدی، توزیع کربن در طول کربوره کردن و نیز توزیع دما و کسر حجمی فازهای مختلف را هنگام سردایش فولاد پیش‌بینی کردند. سیمیر و گور [۶] نیز فرایند کوئنچ یک فولاد کربنی ساده را شبیه‌سازی کرده و اثر هندسه نامتقارن بر تنشهای پسماند حاصله را مورد بررسی قرار دادند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این تحقیقات برای ساده‌سازی مسئله، فرضیاتی مدنظر قرار گرفته است که از طرفی موجب ایجاد خطا در نتایج و از طرف دیگر موجب محدودیت کاربرد روشها شده است. به عنوان مثال اغلب این تحقیقات برروی فولادهای ساده کربنی و خصوصاً فولادهای یوتکتوییدی و نیز بدون در نظر گرفتن دگرگونی مارتنزیتی انجام شده است. به عبارت دیگر در فرایند شبیه‌سازی اکثراً دگرگونیهای نفوذی مدنظر قرار گرفته است. هم‌چنین اغلب مطالعات در حالت دوبعدی متمرکز بوده است. در بسیاری از موارد انجام شده نیز نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی و ساختاری مقایسه نشده است. مطالعه تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که برای درک بهتر این پدیده و ارزیابی رفتار دمایی و ریزساختاری فولادها تحقیقات بیشتری لازم است.

در این پژوهش، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی فرایند کوئنچ فولادها توسعه داده شده است. مدلسازی بر روی قطعات چرخ‌دنده از جنس فولاد کربنی ۱۰۴۵ و فولاد کم‌آلیاژ ۴۱۴۰



شکل ۱- قطعات چرخ‌دنده مورد آزمایش؛ (الف) نقشه مکانیکی (ب) قطعات واقعی.

انجام شده است. در فرایند کوئنچ هر دو نوع فولاد ذکر شده، دو نوع محیط سرد کننده شامل آب و روغن مد نظر قرار گرفت. برای محاسبه ضرایب انتقال گرما حین کوئنچ در این دو محیط، پروبهایی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ ساخته شد و شرایط انتقال گرما به صورت تابعی از دمای سطح توسط روش حل معکوس محاسبه شد. برای افزایش دقت محاسبات، خواص ترموفیزیکی فولاد به صورت متغیر با دما و نوع فازها درنظر گرفته شد. هم‌چنین اثر گرمای نهان آزاد شده در اثر دگرگونیهای فازی در مدل توسعه یافته لحاظ شد. برای مدلسازی دگرگونیهای فازی نفوذی از معادله JMA [۷-۱۰] به همراه قانون جمع‌پذیری [۱۱] استفاده شد. به منظور مدلسازی سینتیک دگرگونی مارتنزیتی در فولاد کربنی، از مدل کوینستینن و ماربرگر [۱۲] و در فولاد کم آلیاژ از یک مدل جدید [۱۳] که برای فولادهای کم آلیاژ توسعه پیدا کرده، استفاده شد. در این تحقیق از نرم‌افزار ANSYS 10.0 استفاده شده است و شبیه‌سازی به کمک برنامه‌نویسی به زبان پارامتری نرم‌افزار (APDL) انجام شده است. هم‌چنین برای پیش‌بینی سختی در نقاط مختلف نمونه‌ها از مدل تجربی مینیر [۱۴] استفاده شد. برای اعتبارسنجی و بررسی کارایی مدل، آزمایشات تجربی بر روی نمونه‌های ذکر شده انجام شد. تاریخچه دمایی نمونه‌ها حین کوئنچ ثبت شد و آزمونهای متالوگرافی و سختی‌سنجی بر روی مقاطع برش‌خورده نمونه‌ها انجام شد. نشان داده شد که با استفاده از مدل گرمایی- ساختاری توسعه یافته می‌توان ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات فولادی را پس از سیکلهای مختلف سرد کردن پیوسته پیش‌بینی کرد.

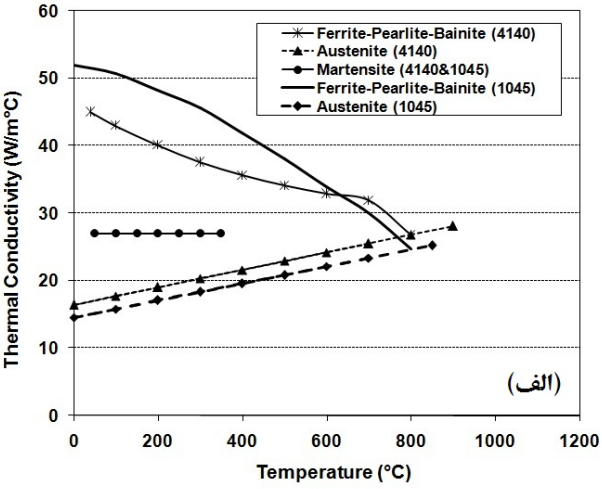
۲- روش آزمایش

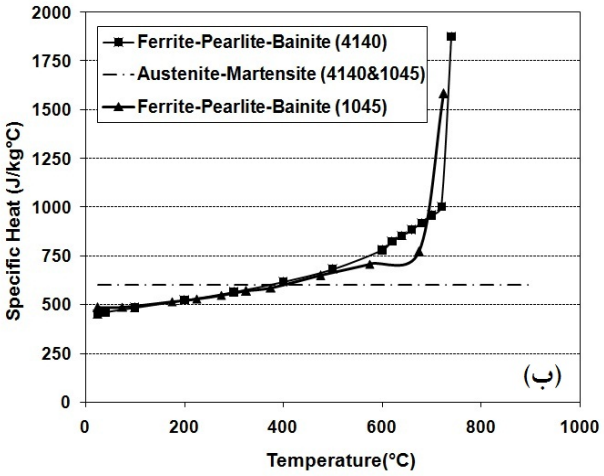
شکل (۱- الف) نقشه مکانیکی قطعات چرخ‌دنده و شکل (۱- ب) چرخ‌دنده‌های واقعی مورد آزمایش را نشان می‌دهند. قطعات پس از آستنیته شدن در دمای $845^{\circ}C$، در آب و روغن کوئنچ شدند. به منظور بررسی نحوه سرد شدن، ترموکوپلهایی از نوع K و به قطر ۰/۳mm درون نمونه‌ها جاسازی شد. همچنین از یک دستگاه رایانه شخصی مجهز به کارت اندازه‌گیری PCI-773 و نرم افزار Lab View 5.1 برای ثبت تاریخچه دمایی نمونه‌ها استفاده شد. پس از سرد شدن، نمونه‌ها برش داده شدند و آزمونهای سختی‌سنجی و متالوگرافی در نقاط مختلف آنها انجام شد. برای اندازه‌گیری کسر حجمی فازهای مختلف، تصاویر حاصل از متالوگرافی نوری، توسط نرم‌افزار تحلیل تصویر Clemex 3.5 مورد بررسی قرار گرفت و کسر حجمی فازها در نقاط مختلف نمونه‌ها تعیین شد.

۳- مدلسازی عددی

۳-۱- مدل انتقال گرما

معادله انتقال گرمای فوریه با در نظر گرفتن گرمای نهان آزاد شده حین دگرگونی در حالت سه بعدی به صورت زیر بیان می‌شود:





شکل ۲- خواص ترموفیزیکی فولادهای مورد بررسی؛ (الف) هدایت گرمایی (ب) گرمای ویژه.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}_t=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱)$$

در این معادله C_p گرمای ویژه، k ضریب هدایت گرمایی و ρ چگالی است. مقادیر C_p و k در هر دما با توجه به کسر حجمی فازهای مختلف و طبق روابط زیر محاسبه شده‌اند:

$$k=\Sigma F_i k_i, C_p=\Sigma F_i C_{pi} \quad (۲)$$

که در آن k_i، C_{pi} و F_i به ترتیب رسانایی گرمایی، گرمای ویژه و کسر حجمی فاز i ام را نشان می‌دهند. همچنین $\dot{q}_t$ گرمای نهان آزاد شده در اثر دگرگونی است و از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}_t=\Delta H_i\frac{\Delta F_i}{\Delta t} \quad (۳)$$

در اینجا ΔH_i گرمای نهان دگرگونی و ΔF_i تغییرات کسر حجمی فاز i ام در مدت زمان Δt است.

شرط اولیه برای این مسئله، دمای اولیه یکنواخت، یعنی دمای آستنیته، قبل از کوئنچ است.

$$T|_{t=0}=T_0 \quad (۴)$$

با توجه به اینکه انتقال گرما به صورت جابه‌جایی انجام می‌شود، شرایط مرزی به صورت زیر در می‌آید:

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=h_C(T_S-T_A) \quad (۵)$$

که درآن، T دمای جاری، T_A دمای محیط سردایش و h_C ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی است.

خواص ترموفیزیکی نقش اساسی در تعیین نحوه سرد شدن فولادها دارند. رسانایی گرمایی و نیز گرمای ویژه فولادها هم تابع نوع ریزساختار و هم تابع دماست. هم‌چنین گرمای نهان آزاد شده در اثر دگرگونیهای فازی تأثیر به‌سزایی در چگونگی سرد شدن فولادها حین فرایند کوئنچ دارد. دارکن و گوری [۱۵]، میزان گرمای آزاد شده در اثر دگرگونیهای نفوذی را به‌صورت تابعی از دما مطابق معادلات زیر ارائه کردند. معادله (۶) گرمای نهان دگرگونی فریتی و معادله (۷) گرمای نهان دگرگونیهای پرلیتی و بینیتی را نشان می‌دهد.

$$\Delta H_F(J/cm^3)=1769.0-5.725T+0.0063T^2-[2.303\times10^{-6}T^3] \quad (۶)$$

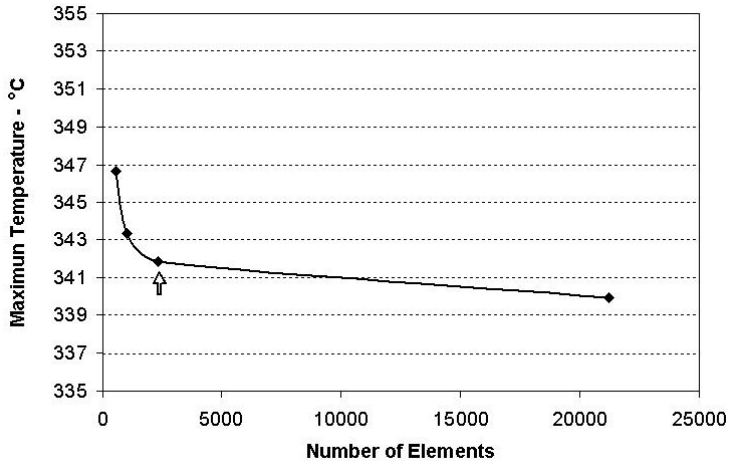
$$\Delta H_{P-B}(J/cm^3)=953.0+0.409T-0.00012T^2 \quad (۷)$$

همچنین اریکسون [۱۶] گرمای نهان دگرگونی مارتنزیتی را به‌صورت زیر ارائه کرده است:

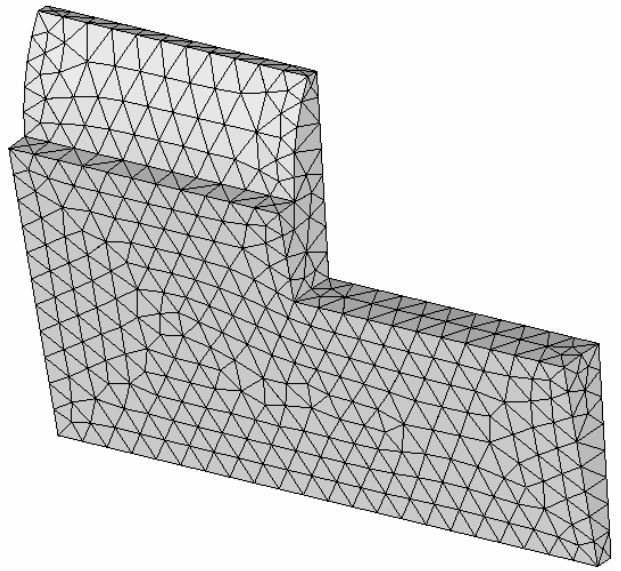
$$\Delta H_M(J/cm^3)=640 \quad (۸)$$

در این پژوهش، چگالی فولاد به‌صورت ثابت و برابر ۷۸۵۰ kg/m^3 در نظر گرفته شده است. رسانایی گرمایی وگرمای ویژه به‌صورت تابعی از دما و نوع فاز برای هر فولاد در شکلهای(۲- الف) و (۲- ب) نشان داده شده است [۱۷ و۱۸].

به دلیل تقارن موجود در قطعه، تنها نصف یکی از دنده‌ها مدلسازی شده است. شکل (۳) نتایج تحلیل حساسیت شبکه را



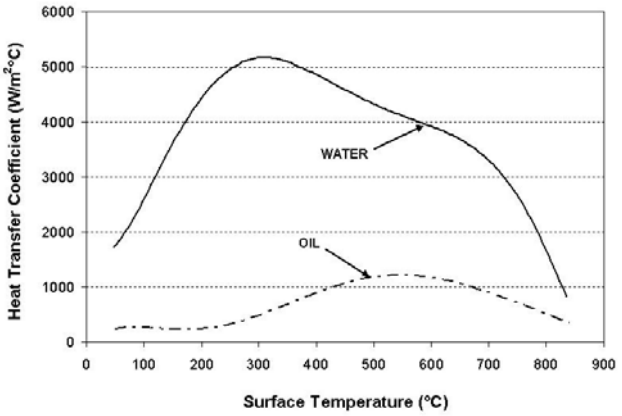
شکل ۳- نتایج آزمون حساسیت شبکه برای چرخ‌دنده.



شکل ۴- شمای مدل و شبکه المان محدود به‌کار گرفته شده برای چرخ‌دنده.

برای چرخ‌دنده نشان می‌دهد. طبق این نتایج، شبکه‌ای با ۷۷۹ گره و ۲۳۱۶ المان به کار گرفته شد. شمای مدل و شبکه‌بندی مورد استفاده در شکل (۴) نشان داده شده است.

یکی از مهمترین عواملی که دقت نتایج شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد چگونگی اعمال انتقال گرمای جابه‌جایی بر روی مدل است. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش شرایط کوئنچ در آب و روغن ساکن بررسی شده است. برای محاسبه ضرایب انتقال گرما حین کوئنچ در این دو محیط، پروبهایی از



شکل ۵- ضرایب انتقال گرمای محاسبه شده برای کوئنچ در آب و روغن به‌صورت تابعی از دمای سطح.

جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ ساخته شد و شرایط انتقال گرما، به‌صورت تابعی از دمای سطح، با یک روش حل معکوس محاسبه شد. شکل (۵) ضرایب انتقال گرمای محاسبه شده را به‌صورت تابعی از دمای سطح نشان می‌دهد [۱۹].

۳-۲- مدل دگرگونیهای فازی

تحت شرایط هم‌دما، سینتیک دگرگونیهای نفوذی را می‌توان توسط معادله JMA به‌صورت زیر توصیف کرد:

$$F_i^j = 1 - \exp(-A.t_j^B) \qquad (۹)$$

که در آن F_i^j کسر حجمی فاز i ام در گام زمانی j ام است. هم‌چنین A و B ثابتهای ماده‌اند که از نمودار TTT به‌دست

می‌آیند. t_j یا زمان سپری شده از شروع دگرگونی، از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$t_j = \left[-\frac{\ln\left(1-F^{j-1}\right)}{A} \right]^{1/B} + \Delta t_j \qquad (۱۰)$$

با این حال معادله JMA برای شرایط ناهمدما کاربرد ندارد. بنابراین از قانون جمع‌پذیری برای توصیف شرایط ناهمدما استفاده می‌شود. طبق این قانون منحنی سرد شدن به گامهای کوچک همدما تقسیم شده و کسر حجمی دگرگونی در این گامهای همدما محاسبه می‌شود. طبق این قاعده، هرگاه شرط زیر برقرار باشد دگرگونی شروع می‌شود.

$$\sum_{j=1}^{m} \frac{\Delta t_j}{\tau_j} \geq 1 \qquad (۱۱)$$

که τ_j زمان لازم برای آغاز دگرگونی در گام زمانی j ام است.

در مورد دگرگونی مارتنزیتی، برای فولاد ساده کربنی از رابطه تجربی که توسط کوینستینن و ماربرگر به‌صورت زیر ارائه شده، استفاده شده است:

$$F_M = 1 - \exp[-0.011(M_s - T)] \qquad (۱۲)$$

برای مدلسازی دگرگونی مارتنزیتی در فولاد کم‌آلیاژ از معادله جدیدی که برای فولادهای کم‌آلیاژ توسعه داده شده، استفاده شد. این معادله به‌صورت زیر است:

$$\frac{dF_M}{dT} = KF_M^a(1-F_M)^b \qquad (۱۳)$$

$$K = \frac{G^{0.240}(M_s - T)^{0.191}}{9.017 + 62.88(\%C) + 9.27(\%Ni) - 1.08(\%Cr) + 0.76(\%Mo)}$$

$$a = 0.0420 - 0.246(\%C) + 0.359(\%C)^2$$

$$b = 0.320 + 0.576(\%C) + 0.933(\%C)^2$$

در اینجا F_M کسرحجمی مارتنزیت، M_s دمای شروع دگرگونی مارتنزیتی و G عدد اندازه دانه ASTM است.

۳-۳- مدل سختی

برای تخمین سختی، از مدل ارائه شده توسط مینیر و همکاران استفاده شده است. طبق این مدل، سختی هر فاز به صورت تابعی از ترکیب شیمیایی و نرخ سرد شدن محاسبه می‌شود و سختی کل، با توجه به کسر حجمی فازها و سختی هر فاز، طبق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$HV = F_M HV_M + F_B HV_B + (F_F + F_P)HV_{F+P} \qquad (۱۴)$$

که در آن F_M، F_B، F_F و F_P به ترتیب، کسر حجمی مارتنزیت، بینیت، فریت و پرلیت بوده و HV سختی فولاد در مقیاس ویکرز است. HV_M، HV_B و HV_{F+P} به ترتیب سختی مارتنزیت، بینیت و فریت+پرلیت‌اند و طبق معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$HV_M = 127 + 949(\%C) + 27(\%Si) + 11(\%Mn) + 8(\%Ni) + 16(\%Cr) + 21\log V_r \qquad (۱۵)$$

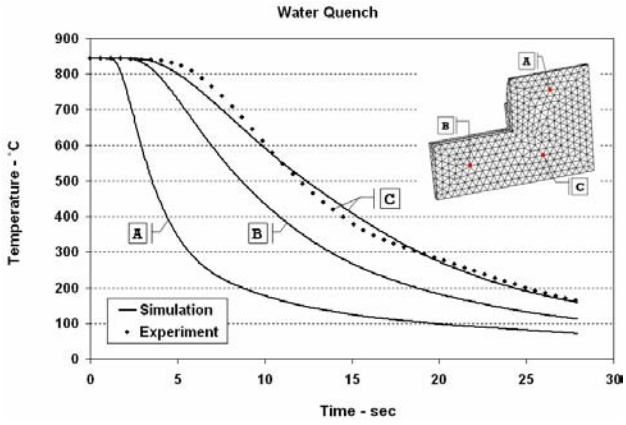
$$HV_B = 323 + 185(\%C) + 330(\%Si) + 153(\%Mn) + 65(\%Ni) + 144(\%Cr) + 191(\%Mo) + (89 + 53(\%C) - 55(\%Si) - 22(\%Mn) - 10(\%Ni) - 20(\%Cr) - 33(\%Mo))\log V_r \qquad (۱۶)$$

$$HV_{F-P} = 42 + 223(\%C) + 53(\%Si) + 30(\%Mn)12.6(\%Ni) + 7(\%Cr) + 19(\%Mo) + (10 - 19(\%Si) + 4(\%Ni) + 8(\%Cr)130(\%V))\log V_r \qquad (۱۷)$$

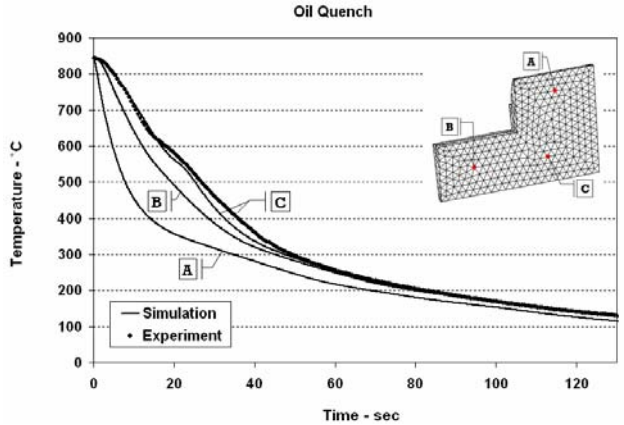
V_r سرعت سرد شدن در دمای ۷۰۰ °C است.

۴- نتایج و بحث

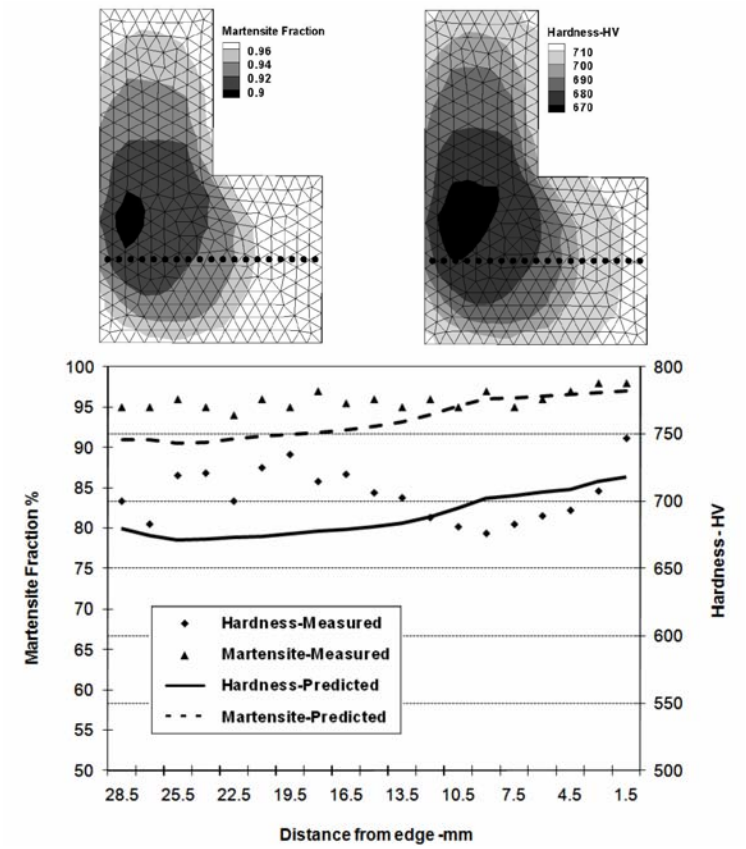
شکل (۶) منحنی سرد شدن نقاط مختلف چرخ‌دنده از جنس ۱۰۴۵ را حین کوئنچ در آب و شکل (۷) منحنیهای سرد شدن را حین کوئنچ در روغن نشان می‌دهد. موقعیت نقاط در شکلها مشخص شده است. همچنین منحنی سرد شدن آزمایشگاهی برای نقطه C در شکلها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در نقطه A که در میان یک دنده قرار دارد، با توجه به ضخامت کم دنده و انتقال گرمایی که از دو طرف دنده رخ می‌دهد، نرخ سرد شدن بالاست. اما نقاط B و C که در جان قطعه قرار دارند، سرعت سرد شدن پایینتری دارند. بدیهی است که نرخ سرد شدن در روغن بسیار پایینتر از آب است. در حالی که حین کوئنچ در آب، دمای نقطه C در زمان حدود ۲۵ ثانیه به ۲۰۰°C می‌رسد، این اتفاق حین کوئنچ در روغن درعرض ۸۰ ثانیه رخ می‌دهد.



شکل ۶- تاریخچه دمایی نقاط مختلف چرخ‌دنده ازجنس فولاد ۱۰۴۵ هنگام کوئنچ در آب.

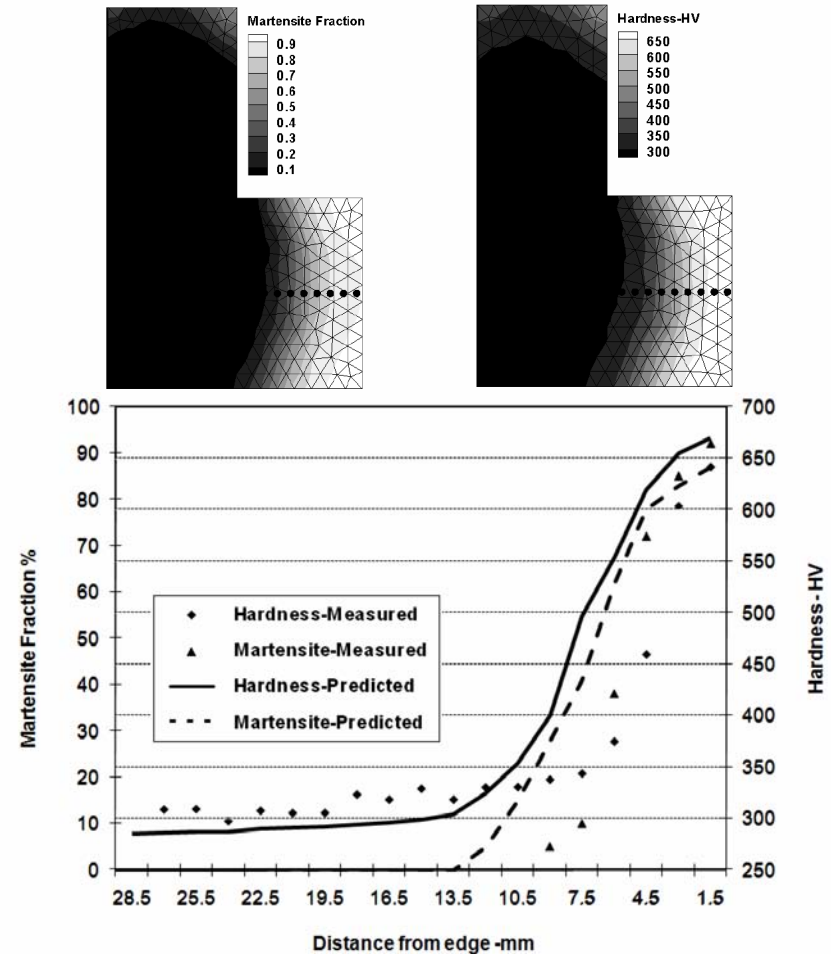


شکل ۷- تاریخچه دمایی نقاط مختلف چرخ‌دنده ازجنس فولاد ۱۰۴۵ هنگام کوئنچ در روغن.

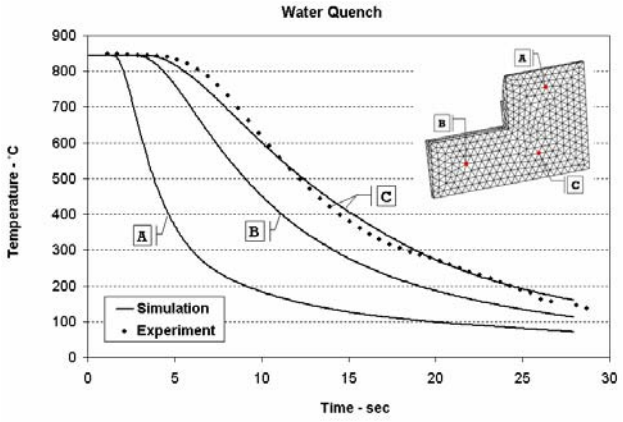


شکل ۸- مقایسه توزیع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده سختی و مارتنزیت در چرخ‌دنده ۱۰۴۵ کوئنچ شده در آب.

شکل (۸) کانتورهای توزیع مارتنزیت و سختی را با مقادیر اندازه‌گیری شده آنها مقایسه می‌کند. نقاط سیاه رنگ در کانتورها، نشان دهنده نقاطی است که آزمونهای متالوگرافی و سختی‌سنجی در آنها انجام شده است. با توجه به بالا بودن نرخ سرد شدن، تقریباً در کل نمونه بیش از ۹۰ درصد آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده است. در نتیجه، سختی نیز در نواحی مختلف چرخ‌دنده بسیار بالاست. کانتورهای توزیع مارتنزیت و سختی و نیز مقادیر آزمایشگاهی آنها برای کوئنچ نمونه ۱۰۴۵



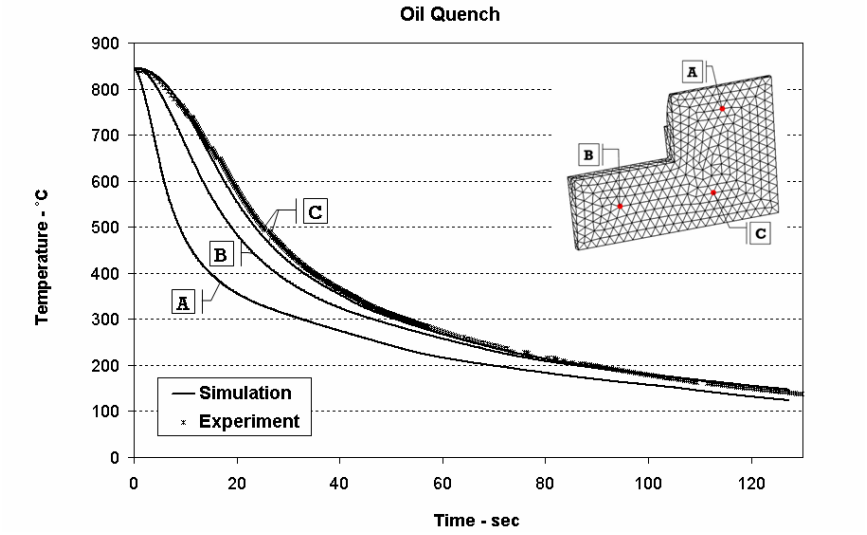
شکل ۹- مقایسه توزیع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده سختی و مارتنزیت در چرخ‌دنده ۱۰۴۵ کوئنچ شده در روغن.



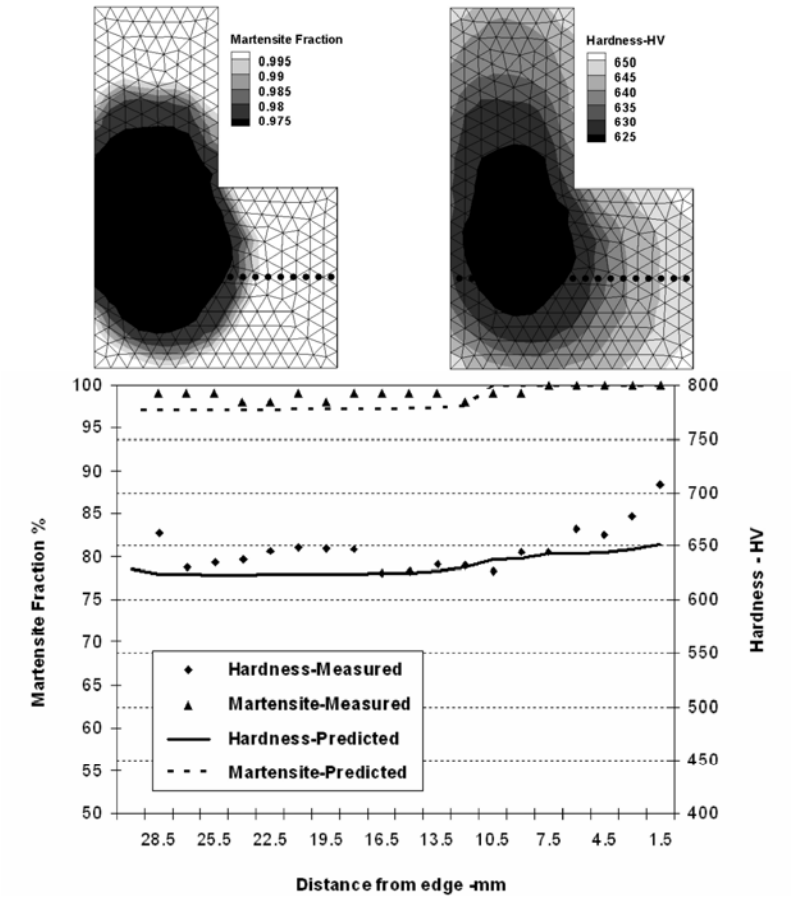
شکل ۱۰- تاریخچه دمایی نقاط مختلف چرخ‌دنده ازجنس فولاد ۴۱۴۰ هنگام کوئنچ در آب.

در روغن در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به اینکه قدرت سرد کنندگی روغن به مراتب کمتر از آب است و نظر به اینکه سختی‌پذیری فولاد ۱۰۴۵ نسبتاً پایین است، مشاهده می‌شود که فقط در نواحی نزدیک دنده‌ها مارتنزیت تشکیل شده و بنابراین سختی زیاد است. در این رابطه، سازگاری مناسبی بین کانتورها و مقادیر شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. با توجه به این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که محیط سرد کننده روغن برای سخت‌کاری قطعه‌ای از این جنس مناسب نیست و ریزساختار و خواص مورد نظر را به‌دست نمی‌دهد.

شکل (۱۰) تاریخچه دمایی چرخ‌دنده ۴۱۴۰ سرد شده در آب و شکل (۱۱) تاریخچه دمایی چرخ‌دنده سرد شده در روغن را نشان می‌دهد. چگونگی سرد شدن در سه نقطه (A، B و C) نشان داده شده است که برای نقطه C نتایج تجربی نیز نمایش داده شده است. سازگاری خوبی که بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود نشان دهنده دقت شرایط مرزی



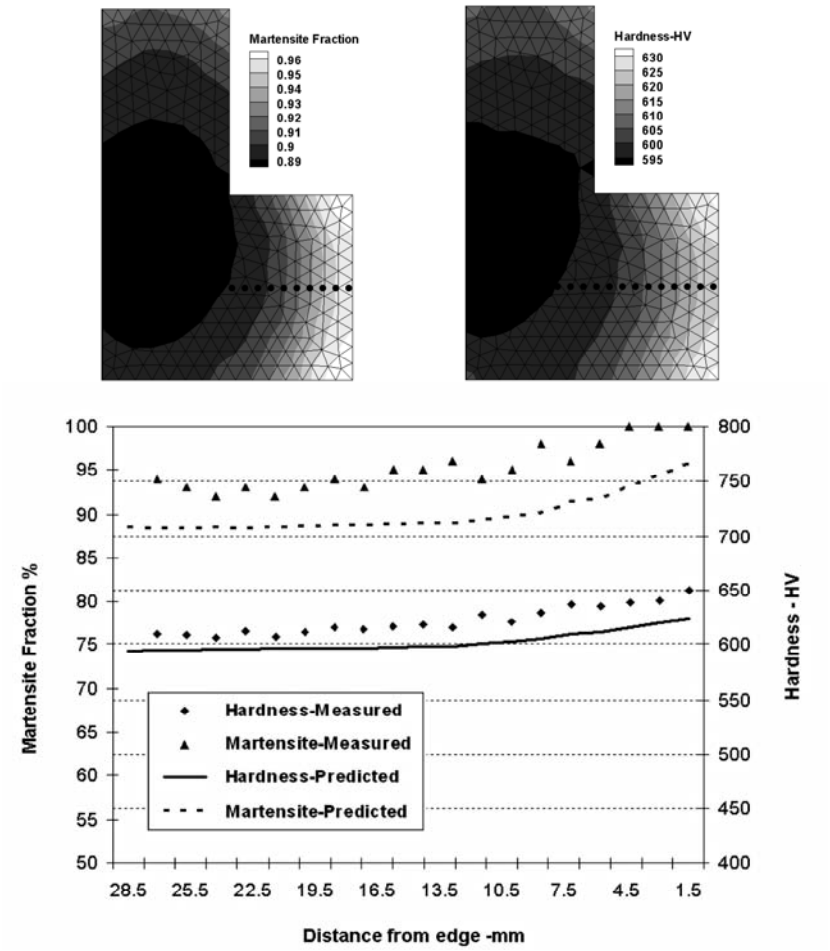
شکل ۱۱- تاریخچه دمایی نقاط مختلف چرخ‌دنده ازجنس فولاد ۴۱۴۰ هنگام کوئنچ در روغن.



شکل ۱۲- مقایسه توزیع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده سختی و مارتنزیت در چرخ‌دنده ۴۱۴۰ کوئنچ شده در آب.

اعمال شده و خواص ترموفیزیکی به‌کار گرفته شده است.

شکل (۱۲) توزیع شبیه‌سازی شده کسر حجمی مارتنزیت و نیز سختی را در چرخ‌دنده ۴۱۴۰ کوئنچ شده در آب نشان می‌دهد. هم‌چنین، نتایج آزمایشگاهی نیز برای مقایسه ارائه شده



شکل ۱۳- مقایسه توزیع اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده سختی و مارتنزیت در چرخ‌دنده ۴۱۴۰ کوئنچ شده در روغن.

است. به‌طور مشابه، شکل (۱۳) توزیع شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مارتنزیت و سختی در چرخ‌دنده کوئنچ شده در روغن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز سازگاری خوبی بین نتایج وجود دارد. خطاهای موجود، ممکن است دلایل مختلفی داشته باشد. برخی از خطاها ممکن است ناشی از روشهای آزمایشگاهی مورد استفاده باشد. به‌طور مثال؛ خطا در آزمونهای متالوگرافی و یا خطا در تحلیل ترکیب شیمیایی نمونه‌ها که می‌تواند به خطا در تخمین سختی منجر شود. دیگر منشأ خطا، اختلاف احتمالی بین ترکیب شیمیایی و اندازه دانه نمونه‌های مورد آزمایش و نمونه‌های مورد استفاده برای ترسیم نمودارهای TTT است.

به دلیل بالا بودن سختی‌پذیری فولاد ۴۱۴۰، حین کوئنچ در آب و روغن، اکثر آستنیت تبدیل به مارتنزیت می‌شود. به علت بالا بودن شدت سرد کنندگی آب، بیشتر آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود و تنها مقدار اندکی فریت و بینیت در نواحی میانی چرخ‌دنده تشکیل می‌شود. اما حین کوئنچ در روغن، مقدار مارتنزیت تشکیل شده کمتر و مقدار فریت و بینیت بیشتر است. طبق نتایج شبیه‌سازی، چه در کوئنچ در آب و چه در کوئنچ در روغن، پرلیت در قطعات تشکیل نمی‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که برای سخت‌کاری چنین قطعه‌ای ازجنس فولاد ۴۱۴۰، استفاده از محیطهای سردکننده با شدت سردکنندگی بالا، مانند آب، لزومی ندارد. زیرا استفاده از این محیطها ممکن است منجر به اثرات نامطلوبی مانند تنشهای پسماند، اعوجاج وترک در قطعات شود. بنابراین می‌توان با استفاده از محیطهای سرد کننده با شدت کمتر، هم خواص مورد نظر را به‌دست آورد و هم از وقوع این اثرات نامطلوب پیش‌گیری کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل عددی سه بعدی برای شبیه‌سازی فرایند سرد کردن پیوسته فولادها توسعه داده شد و به کمک آن فرایند سرد شدن چرخ دنده‌هایی از جنس دو نوع فولاد ۱۰۴۵ و ۴۱۴۰ حین کوئنچ در آب و روغن شبیه‌سازی شد. نتایج مدل نشان داد که حین کوئنچ نمونه‌های فولاد ۱۰۴۵ در روغن به دلیل پایین بودن شدت سرد کنندگی روغن و نیز پایین بودن سختی‌پذیری این فولاد، در نواحی مرکزی، آستنیت به فریت و پرلیت تبدیل می‌شود. با این حال در مقاطع نازک چرخ‌دنده به دلیل بالا بودن سرعت سرد شدن، آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. اما در نمونه‌های فولاد ۴۱۴۰، با توجه به بالا بودن سختی‌پذیری این فولاد، در شرایط کوئنچ در روغن نیز اغلب آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در این فولاد، فقط در سرعتهای سرد شدن بسیار پایین، ریزساختارهای فریت و پرلیت مشاهده می‌شود، در حالی که در سرعتهای سرد کردن میانی، بیشتر بینیت مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که برای قطعه از جنس فولاد ۱۰۴۵ کوئنچ در آب و برای قطعه از جنس فولاد ۴۱۴۰ کوئنچ در روغن مناسبتر است. با توجه به پیچیدگیهایی که در فرایند سرد کردن پیوسته فولادها حاکم است، مشاهده شد که مدل حاضر هم برای فولاد ساده کربنی و هم برای فولاد کم آلیاژ کارایی مناسبی دارد و نتایج شبیه‌سازی در بخشهای مختلف گرمایی، ساختاری و سختی تطابق خوبی را با نتایج آزمایشات تجربی نشان داد. با استفاده از مدل گرمایی،- ساختاری توسعه یافته در این پژوهش می‌توان ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات فولادی را پس از سیکلهای مختلف سرد کردن پیوسته پیش‌بینی کرد.

مراجع

1. Agarwal, P. K., and Brimacombe, J. K., "Mathematical Model of Heat Flow and Austenite-Pearlite Transformation in Eutectoid Carbon Steel Rods for Wire," *Metall. Trans. B*, Vol. 12, pp.121-33, 1981.
2. Wang, K. F., Chandrasekar, S., and Yang, H. T. Y., "An Efficient 2D Finite Element Procedure for Quenching Analysis with Phase Change," *Trans. ASME J. Eng. Ind.*, Vol. 115, pp. 124-138, 1993.
3. Huiping, L., Guoqun, Z., Shanting, N., and Chuanzhen, H., "FEM Simulation of Quenching Process and Experimental Verification of Simulation Results," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 452-453, pp. 705-714, 2007.
4. Kang, S. H., and Im, Y. T., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Quenching Process of Plain-Carbon Steel with Phase Change," *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 36, pp. 2315-25, 2005.
5. Kang, S. H., and Im, Y. T., "Finite Element Investigation of Multi-Phase Transformation within Carburized Carbon Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, pp. 241–248, 2007.
6. Şimşir, C, and Gür, C. H., "3D FEM Simulation of Steel Quenching and Investigation of the Effect of Asymmetric Geometry on Residual Stress Distribution," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, pp. 211-21, 2008.
7. Johnson, W. A., and Mehl, R. F., "Reaction Kinetics in Processes of Nucleation anfd Growth," *Trans. AIME*, Vol. 135, p. 416, 1939.
8. Avrami, M., "Kinetics of Phase Change. I General Theory," *J. Chem. Phys.*, Vol. 7, p. 1103, 1939.
9. Avrami, M., "Kinetics of Phase Change. II Transformation - Time Relations for Random Distribution of Nuclei," *J. Chem. Phys.*, Vol. 8, p. 212, 1940.
10. Avrami, M., "Granulation, Phase Change, and Microstructure Kinetics of Phase Change. III," *J. Chem. Phys.*, Vol. 9, p. 177, 1941.
11. Scheil, E., *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol. 12, pp. 564-67, 1935.
12. Koistinen, D. P., and Marburger, R. E., "A General Equation Prescribing the Extent of the Austenite–Martensite Transformation in Pure Iron–Carbon Alloys and Carbon Steels," *Acta Metall.*, Vol. 7, pp. 59–60, 1959.
13. Lee, S –J, and Lee Y –K, "Finite Element Simulation of Quench Distortion in a Low-Alloy Steel Incorporating Transformation Kinetics," *Acta Mater.*, Vol. 56, pp. 1482–90, 2008.
14. Maynier, P., Dollet, J., and Bastien, P., "Hardenability Concepts with Application to Steel," *AIME*, New York, NY, pp. 518-544, 1978.
15. Darken, L. S., and Gury, R. W., *Physical Chemistry of Metals*, McGraw-Hill, New York, 1953.
16. Ericsson, T., Sjöström, S., and Knuuttila, M., "Predicting Residual Stresses in Cases: Case Hardened Steels," *TMS-AIME*, Warrendale, PA, 1983.

۱۹. اشراقی کاخکی، م.، "مدلسازی عددی فرایند سرد کردن پیوسته فولادها به منظور پیش‌بینی ریزساختار و خواص مکانیکی،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۸.

17. Bagdade, S. D., *Thermal Properties of Metals*, ASM International, Metals Park, OH, 2002.
18. Griffiths, E., *Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures*, Butterworths Scientific Publication ,London, 1953.